



光-音響・熱放射法による半導体材料・プロセス評価に関する研究

著者	中村 弘通
号	1028
発行年	1985
URL	http://hdl.handle.net/10097/9764

氏 名	なか	むら	ひろ	みち
	中	村	弘	通
授 与 学 位	工	学	博	士
学位授与年月日	昭和 61 年 3 月 25 日			
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項			
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科			
	(博士課程) 電気及通信工学専攻			
学 位 論 文 題 目	光－音響・熱放射法による半導体材料・プロセス評価に関する研究			
指 導 教 官	東北大学教授 御子柴宣夫			
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 御子柴宣夫	東北大学教授 山之内和彦		
	東北大学教授 大見 忠弘	東北大学助教授 坪内 和夫		

論 文 内 容 要 旨

近年，大容量かつ高速の通信システムおよび情報処理機器の発達に伴い，シリコン(Si)集積回路の大容量化，微細化，高速化がますます要求されるようになり，また III-V 化合物半導体の一つであるガリウムヒ素(GaAs)が，マイクロ波用トランジスタ，高速動作集積回路，光エレクトロニクス素子用材料として注目されるようになった。このような状況の中で，半導体材料基板の高品質化，半導体デバイス製造プロセスの低温化，半導体デバイスの性能・信頼性の向上などが重要課題として取り上げられている。

基板の高品質化においては，結晶欠陥の一つである転位の発生は抑えられるようになってきたが，素子の微細化に伴い転位以外の微小欠陥の存在が，素子特性の不均一性をもたらすものとしてクローズアップされるようになり，この微小欠陥の評価および制御が課題となっている。プロセスの低温化においては，光エネルギー特に光化学反応を利用した薄膜形成・エッチング・不純物ドーピング技術，レーザアニーリング技術などが注目されるようになってきたが，光化学反応過程の解明や，光エネルギーなどを照射した際の局所的な過渡温度上昇のモニターや制御などが課題となっている。また，デバイスの性能・信頼性の向上においては，集積回路の高速動作における金属配線の断線，発光デバイスの発光効率・寿命の劣化や瞬時光学損傷などが問題になっており，非発光緩和過程の存在や局所的な過渡温度上昇が原因である場合が多い。

本研究は，特に半導体材料とプロセスにおける非発光性欠陥，非発光緩和過程および局所的過渡

温度上昇の評価の重要性に着目し、評価法として光音響法と光熱放射法をとりあげ、独自に評価装置を開発してその有用性を示したものである。以下、本論文の概要を各章ごとにまとめる。

第 1 章 序 論

本章では、本研究を行なうに至った動機について述べ、光音響法と光熱放射法に関する研究の歴史的背景を概観し、本研究の意義と目的を明らかにした。

第 2 章 圧電素子型光音響法による半導体中の欠陥の評価

本章では、半導体中の欠陥における非発光再結合過程の検出に着目した圧電素子型光音響顕微鏡を開発し、熱酸化 Si ウェーハ中の酸化誘起積層欠陥 (OSF) の非破壊評価に応用した。光源には He-Ne レーザを用い、圧電素子には ZnO 薄膜 (厚さ $\sim 10 \mu\text{m}$) を用いた。この圧電素子型光音響顕微鏡を用いて、熱酸化 Si ウェーハを室温でしかも酸化膜が付いたままの状態ですべて非破壊的に観察した結果、個々の OSF に対応して光音響信号のピークが観測できることを明らかにした。空間分解能は約 $60 \mu\text{m}$ であり、さらに向上できる見通しについても述べた。

次に、従来不明確であった半導体試料における光音響信号の発生・検出メカニズムを検討し、圧電素子型音響法の場合について光音響信号の理論モデルを提案した。さらに、Si について数値的検討を行ない、理論モデルの妥当性が確かめ、以下のことを明らかにした。

- 1) 光音響信号の強度の理論計算値が、ファクター 2 \sim 8 で測定値に一致する。
- 2) 低いチョッピング周波数領域 ($< 1 \text{ kHz}$) で、光音響信号の強度と位相が圧電素子のインピーダンスに依存する。
- 3) 光音響信号の位相の測定データを、導出した理論式で解析することにより、Si ウェーハにおける少数キャリア寿命と表面再結合速度の分離測定、表面再結合速度の変化および励起エネルギーの違いによる緩和過程の差が評価できる。

第 3 章 光熱放射法による半導体中の欠陥の非破壊非接触評価

本章では、半導体中の欠陥における非発光緩和過程の観測に着目した光熱放射分光顕微鏡を開発し、GaAs ウェーハ中の非発光性欠陥のエネルギー準位および空間分布の非破壊非接触評価に応用した。光源にはクリプトンイオンレーザー励起の色素レーザーを用い、試料からの熱放射の検出には高感度 HgCdTe 赤外線検出器を用いた。

エッチピット密度 (EPD) が異なる有転位 n 型 GaAs ウェーハの光熱放射信号の励起光エネルギー依存性 (光熱放射スペクトル) を測定した結果、図 1 に示すように EPD が大きな ($\text{EPD} > 10^4 \text{ cm}^{-2}$) GaAs ウェーハの光熱放射スペクトルにおいてのみ、波長 895 nm 近傍に特異なピークが観察されることを明らかにした。このピークは転位密度と相関がある非発光性欠陥のエネルギー準位に起因していると考えられる。また、励起光波長を 895 nm に固定して、有転位 n 型 GaAs ウェーハ面内の光熱放射信号の空間分布 (光熱放射トポグラフ) を測定した結果、光熱放射トポグラフがフォトルミネッセンス (PL) トポグラフおよび転位密度分布と逆の相関を示すことを明らかにした。

波長 895 nm の光熱放射信号のピークは、転位以外の微小欠陥によって形成された非発光性エネルギー準位に起因していると考えられる。同一ウェーハ面内における光熱放射トポグラフは、転位と逆の分布の微小欠陥の分布を示していると考えられる。

次に、無転位領域が存在する In ドープ n 型 GaAs ウェーハの光熱放射スペクトルを測定した結果、図 2 に示すように無転位領域においても波長 903 nm 近傍に光熱放射信号のピークが観察されることを明らかにした。波長 903 nm の光熱放射信号も転位以外の微小欠陥に起因し、895 nm から 903 nm へのピーク波長の変化は In ドープによるバンドギャップエネルギーの減少に起因していると考えられる。また、励起光波長を 903 nm に固定して光熱放射トポグラフを測定した結果、光熱放射トポグラフが X 線トポグラフや PL トポグラフでは明確に観察できない転位以外の微小欠陥の分布を示すことを明らかにした。

次に、光熱放射信号の発生・検出メカニズムを理論的に検討し、検出できる最小の温度変化を表わす雑音等価温度差を評価し、測定値との比較および従来の光音響法との比較を行なった。その結果、光熱放射法で 0.05 K 程度の微小温度変化を検出でき、光音響法と同程度の感度が得られる見通しを明らかにした。

第 4 章 光音響分光法による光化学反応の観測

光化学反応を利用した半導体製造プロセスにおける原料ガスの光化学反応メカニズムの解明、および効率的に光化学反応を誘起させる照射光波長の選択に、非発光緩和のエネルギー収率の定量測定が重要である点に着目した。本章では、ガスセル・マイクロフォン法を用いた光音響分光装置を

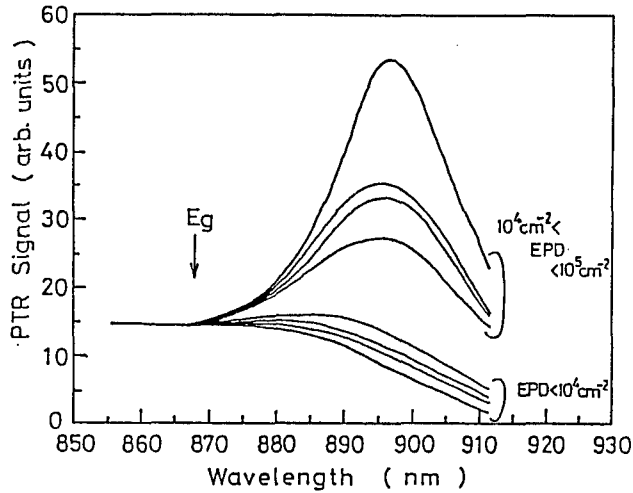


図 1 有転位 n 型 GaAs ウェーハの光熱放射スペクトルのエッチピット密度 (EPD) 依存性

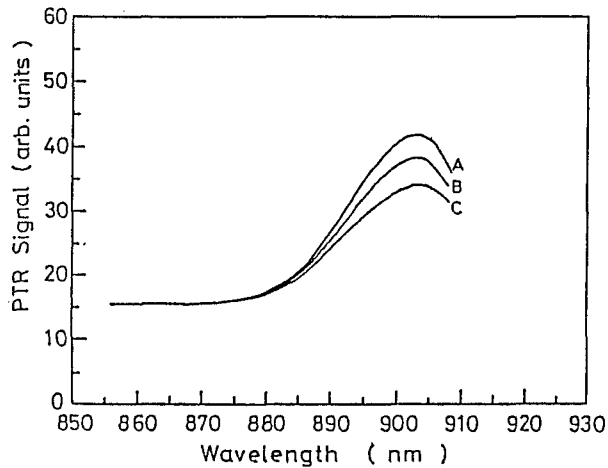


図 2 In ドープ n 型 GaAs ウェーハの光熱放射スペクトル (A, B: 有転位領域, C: 無転位領域)

独自に開発し、基礎実験として気相ベンゼンの非発光緩和過程の観測および非発光エネルギー収率の測定に応用した。

その結果、従来不明確であった気相ベンゼンの第三チャンネル(242～233 nm)での緩和過程が、主に熱発生を伴う励起一重項状態から基底状態への非発光緩和過程であることがわかった。また、気相ベンゼンの第三チャンネルの短波長側(< 233 nm)で、光化学反応収率の増加に対応していると思われる非発光緩和エネルギー収率の減少を観測できた。以上の結果より、蛍光・燐光測定が不可能な波長領域での光化学反応の観測に光音響分光法が有効であることが明らかとなった。

第 5 章 結 論

本研究を通して得られた結論を総括して述べている。

審 査 結 果 の 要 旨

近年、半導体デバイスの高性能化のために、半導体材料基板の高品質化、半導体デバイス製造プロセスの低温化、半導体デバイスの信頼性の向上などが重要課題になってきている。基板の高品質化においては、転位の発生は抑えられるようになってきたが、転位以外の微小欠陥の存在が注目され、その評価と制御が問題となってきている。プロセスの低温化においては、光エネルギーの利用が注目されてきたが、光照射の際の局所的温度上昇のモニターと制御が課題となっている。また、デバイスの信頼性向上に関連して、集積回路での金属配線の断線や発光デバイスの効率や寿命の劣化の問題において、非発光過程や局所的な温度上昇が原因である場合が多い。

本研究は、とくに半導体材料とプロセスにおける非発光緩和過程と局所的な過渡温度上昇の評価法として、光音響法と光熱放射法をとりあげ、新しい評価装置を開発してその有用性を示したもので、全文5章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、半導体中の欠陥における非発光再結合過程の検出に着目した光音響顕微鏡を開発し、熱酸化シリコン中の酸化誘起積層欠陥の非破壊評価ができたことについて述べている。また、圧電素子型光音響法の場合について、光音響信号の発生と検出のメカニズムの理論モデルを提案し、シリコンについて数値的検討を行い、この理論モデルの妥当性を確かめている。

第3章では、半導体中の欠陥における非発光過程の非接触観測に着目し、多くの特長をもつ新しい光熱放射分光顕微鏡を開発し、ガリウムヒ素中の非発光性欠陥のエネルギー準位とその空間分布の非破壊非接触評価に成功したことを述べている。とくに、ガリウムヒ素における微小欠陥像の観測に成功したことは注目に値する。本章ではまた、光熱放射信号の発生と検出のメカニズムについて理論的検討を行い、光音響法と同程度の感度を得られる見通しを明らかにしている。

第4章では、光化学反応を利用した半導体製造プロセスにおいて、非発光緩和過程の定量的測定が重要であることに着目して、ガス・マイクロフォン法を用いた光音響分光装置を開発した結果について述べている。基礎実験の試料として選んだ気相ベンゼンの非発光緩和過程について、幾つかの有用な知見を得ていることは評価しうる成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、半導体中の非発光緩和過程と局所的な過渡温度上昇の検出を主目的として、光音響法と光熱放射法に基づく新しい評価装置を開発し、幾つかの有用な知見を得た結果を述べたもので、半導体工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。